



PRÉDICTION DE RISQUE CEM POUR UN VÉHICULE

T Raynaud, M Bréant, Olivier Maurice, Alain Reineix

► To cite this version:

T Raynaud, M Bréant, Olivier Maurice, Alain Reineix. PRÉDICTION DE RISQUE CEM POUR UN VÉHICULE. 18ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM 2016), Jul 2016, Rennes, France. hal-01347896

HAL Id: hal-01347896

<https://hal.science/hal-01347896>

Submitted on 21 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PRÉDICTION DE RISQUE CEM POUR UN VÉHICULE

T. Raynaud¹, M. Bréant², O. Maurice³, A. Reineix⁴

¹GERAC, Longayrie, 46100 Gramat, thomas.raynaud@gerac.com

²GERAC, 3 avenue Jean d'Alembert, 78190 Trappes, maxime.breant@gerac.com

³IRSEEM, Technopole du Madrillet, 76801 St Etienne du Rouvray, olivier.maurice@esigelec.fr

⁴XLIM, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, alain.reineix@xlim.fr

Abstract. Nous présentons dans cet article l'application de la méthode de Kron pour prédire les risques en CEM d'un véhicule imaginé, pourvu d'équipements et de câblages. L'objectif de la présentation est d'expliquer comment la méthode est utilisée dans une phase amont de conception pour la CEM. D'autres publications aujourd'hui nombreuses mettent en évidence ses performances dans la capacité de modéliser des systèmes complexes. L'objet ici est bien d'aborder l'aspect méthodologie et l'approche dans la conception en CEM système en utilisant ce formalisme. Une comparaison est faite avec les deux techniques connues à l'échelle du système que constituent les approches de "durcissement" et celle de "déclinaison des contraintes". Nous discuterons à ce propos de la notion de topologie et du choix des topologies. Nous donnerons deux exemples comme éléments de rappel des nombreux modèles aujourd'hui disponibles développés dans le cadre de la méthode de Kron et utilisables dans des contextes similaires.

I. INTRODUCTION

Le véhicule choisi est un camion standard soumis à un champ provenant d'une impulsion électromagnétique d'origine nucléaire. Nous présentons tout d'abord la démarche et la positionnons par rapport aux démarches de durcissement et de déclinaison des contraintes. Puis nous présentons les hypothèses d'architecture du véhicule et les schémas associés à chaque équipement. Ensuite on construit le système par ajout des câblages et couplages avec les volumes métalliques fermés ou ouverts de la cabine et de la remorque. On détaille quelques uns des couplages impliqués, dont avec le champ externe. On donne enfin quelques exemples de résultats. Pour conclure nous discutons de la notion de choix de la topologie représentative du système et de la validation, si ce terme a un sens, de ce choix.

II. Positionnement de l'approche par rapport à celles de durcissement ou déclinaison des contraintes

Sous l'hypothèse de "good shielding approximation" qui s'appliquait aux systèmes stratégiques dans les années "80", furent développées des méthodes de conception systèmes qui s'avéraient déjà efficaces pour faire les

choix architecturaux adéquats des missions de ces systèmes. D'autres techniques dont celles de décomposition topologique s'en déduisent, mais qui restaient attachées à la même hypothèse. Sans doute peut-on résumer ces périodes par leurs deux apports qui restent applicables même dans le cas de systèmes civils : à savoir les modèles de blindages (câbles ou structures) et les modèles en immunité des composants (on peut considérer en effet que les techniques de filtrages sont du bagage ordinaire de tout électronicien et que les interactions champ - systèmes sont du domaine général de l'électromagnétisme et des antennistes). Avec l'avènement des exigences sur les matériels civils s'est brutalement posé la difficulté de concevoir des systèmes pour la CEM pour lesquels la notion de "good shielding approximation" n'avait aucun sens. On se situe clairement pour ces systèmes dans des entrelacements d'interactions multiples et adressant toutes les couches entre elles. Pour des raisons complexes, la démarche de déclinaison des contraintes s'est petit à petit imposée, reléguant chez l'équipementier la responsabilité de concevoir des équipements électroniques robustes à des exigences définies (lequel reporte parfois cette responsabilité chez le fondeur). Cette approche a eu le mérite de faciliter le développement et la maîtrise d'outils électromagnétiques - "solver 3D" résolvant les équations de Maxwell. Mais ces outils, même si la connaissance progresse, sont loin de pouvoir modéliser un système dans son ensemble et sont par ailleurs des réalisations d'expériences virtuelles et non des moyens pour théoriser la conception système. Le formalisme de l'analyse tensorielle des réseaux, développé dans le cadre de la méthode de Kron permet d'ailleurs de théoriser ces différentes approches. Nous allons de fait les étudier sous ce jour. En particulier, on a pu démontrer que d'une manière générale, le risque de perturbation R s'exprime par une formule du type [1] :

$$R = \frac{W.S}{P_c} \quad (1)$$

W étant lié à l'énergie des sources de l'environnement qui agresse le système, S étant une image de la transparence du système vis à vis de ces agresseurs, c'est-à-dire l'inverse de son opacité à transmettre cette énergie des couches externes vers les couches internes et P_c la puissance seuil en immunité des composants.

II.1. Durcissement

Suivant les hypothèses de "good shielding approximation", des frontières nettes séparent des sous-ensembles du système. Ces frontières forcément électromagnétiques sont des structures de blindages qui, même si elles sont pourvues d'ouvertures, isolent un volume dans le système des éléments qui n'y sont pas inclus. Il peut en être ainsi d'un sous-volume inclu dans le précédent. La figure 1 représente ces sous-volumes inscrits les uns dans les autres et séparées par ces frontières qui apportent chacune une atténuation significative dans les couplages entre les différents éléments qui appartiennent aux différents sous-volumes.

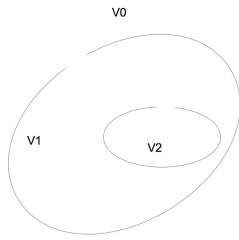


Fig. 1. Approche par sous-volumes.

Chaque enceinte blindée apportant son lot d'atténuation, on peut dresser un tableau qui recense les estimations de ces atténuations, depuis le volume le plus externe vers le volume le plus intérieur. Ces atténuations sont exprimées en décibels. En donnant en dBm l'intensité de la source, on aboutit à la puissance délivrée aux bornes des composants, et connaissant leurs niveaux de susceptibilité, on en déduit le risque de perturbation. Par rapport à la décomposition en domaine décrite figure 1, on trouverait un tableau qui ressemblerait à :

V_0	30 dBm		
V_1	40 dB		
V_2		25 dB	
bilan			-35 dBm

Ce tableau est souvent appelé "matrice d'interaction". Il a l'avantage de donner très rapidement une image de la transmission de l'énergie depuis l'environnement jusqu'aux bornes des composants. On va ainsi évaluer des solutions diverses pour avoir en final les bons niveaux acceptables en puissances transmises aux composants. On réduit le risque ici sans jouer sur les termes W ni P_c de l'expression de R qui sont des données d'entrée, mais en modulant la valeur de S . Reformulé sous l'analyse tensorielle des réseaux, cette décomposition s'exprime par des coefficients de couplages qui assurent des transmission entre les seules couches adjacentes dans le tenseur fondamental en impédance du système. Ainsi si Z_0 est l'impédance d'une maille représentant la source qui ap-

partient au volume V_0 , si Z_1 est l'impédance d'une maille qui représente un objet appartenant au volume V_1 et de même Z_2 une impédance de la maille représentant un circuit appartenant au volume V_2 , le tenseur fondamental z aurait l'allure suivante :

$$z = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ \alpha & Z_1 & 0 \\ 0 & \beta & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

α et β sont des fonctions de couplages quelconques. On voit que la structure de z est diagonale. Cette structure est une signature d'un système qui répond à l'hypothèse de "good shielding approximation" puisqu'aucune fonction de couplage ne relie des couches non adjacentes.

Dans cette démarche, le point remarquable est que le système adapte sa structure aux capacités des composants. Evidemment dans la réalité, cette affirmation est modulée. Mais c'était bien l'approche utilisée sur les premiers systèmes stratégiques quand des concepteurs prenaient en charge l'ensemble du système. Ce fait vient principalement du constat que les composants ne seraient pas capables intrinsèquement de supporter les contraintes des environnements considérés, contraintes extrêmement élevées, comparées à celles appliquées sur les systèmes civils. Même si les tests normatifs peuvent définir des niveaux comparables dans le cas des véhicules terrestres civils ou militaires, les systèmes stratégiques qui étaient les premières cibles de ces calculs de durcissement subissent eux des agressions de très forts niveaux, sans comparaison avec les niveaux considérés sur les autres systèmes.

II.2. Déclinaison des contraintes

La stratégie de conception en CEM de systèmes stratégiques ne peut pas être appliquée aux systèmes civils bas coûts. Autant les premiers systèmes incorporaient dans leur conception des données provenant de la CEM, et en ce sens sont aussi les seuls à avoir réellement pris en compte la CEM dans les objectifs de sûreté de fonctionnement, autant les seconds avaient déjà définis leurs structures et câblages et devaient ajouter une nouvelle contrainte de par l'évolution des normes et de l'électronique. Les situations technologiques et historiques étaient donc sans comparaison. Les systèmes civils sont donc plutôt partis des performances courantes en atténuation des contraintes électromagnétiques de leurs structures et les ont reporté vers les équipementiers, en leur demandant de tenir ces contraintes. Cette démarche était sans conteste la plus simple alors, même si aujourd'hui elle demanderait à être révisée. Par rapport à la formule du risque, la levée de risque s'effectue donc ici en jouant non plus sur la transmission S mais sur les niveaux d'immunité P_c , reporté sur les entrées des équipements. Comme les structures de ces systèmes comportaient peu de blindages, ou très ouverts, un tenseur fondamental

associé à un tel système perd sa particularité de diagonalisation pour avoir des termes de couplages très nombreux. On ne peut plus parler de décomposition par domaines comme précédemment, mais plutôt de structures intégrées pour fabriquer le système, et couplées entre elles lors de cette construction. Le schéma précédent prendrait de fait l'apparence présentée figure 2.

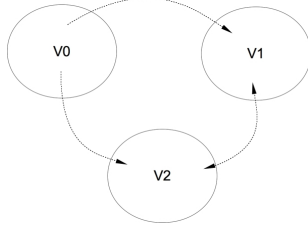


Fig. 2. Déclinaison des contraintes.

Le tenseur fondamental pour de telles structures, prend l'allure suivante :

$$z = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ \alpha & Z_1 & \zeta \\ \beta & \zeta & Z_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A l'échelle d'un système réel son organisation non diagonale est évidente (ces systèmes sont par définition plus compliqués puisque le nombre de composants extradiagonales est plus grand). Le report des exigences de tenue aux environnements civils vers les équipementiers constitue ce que l'on appelle la déclinaison des contraintes. Les équipementiers prennent ces déclinaisons comme données d'entrée et conçoivent des équipements qui supportent les niveaux déclinés. Toute la difficulté réside dans la détermination des niveaux car l'information technologique n'est pas partagée. Ainsi d'une part le "systémier" ne peut connaître les impédances des entrées des équipements et donc précisément déterminer les contraintes, d'autre part l'équipementier ne connaît pas les conditions d'installation système ni les impédances des autres équipements, et ne peut donc calculer précisément les protections pour son équipement. L'exercice de déclinaison n'est donc pas trivial, et souvent basé sur des hypothèses fortes pas toujours vérifiées. Pour améliorer la déclinaison et la rendre plus pertinente suivant les positions des équipements tout en répondant à un besoin de simplification et de normalisation, la technique usuelle est de définir des zones de contraintes différentes, qui renvoient vers autant de définitions des sources d'agressions déclinées.

II.3. Comparaison de ces approches avec une approche par la méthode de Kron

La démarche de durcissement et la décomposition de domaines considèrent le système complet et positionne la stratégie de protection compte-tenu de la susceptibilité des composants et équipements. Les propriétés de

blindages fortement couvrant permettent cette décomposition en domaines. La matrice d'interaction suivant la même démarche dans sa construction. Dans la déclinaison des contraintes, on admet un système prédéfini et l'on vient transmettre aux concepteurs des équipements les exigences de tenues en CEM. Dans les deux cas on part du système. La méthode de Kron (et l'on parle bien de la méthode, pas du formalisme), part au contraire des composants ou équipements, appelés "réseaux primitifs" et va construire le système tel que fait dans la réalité en ajoutant pour la CEM des interactions électromagnétiques spécifiques. La force de cette approche est de ne pas présager des atténuations des structures et construit l'état des interactions sur la base de celles créées en construisant le système. Il n'est pas question de fait de décomposition de domaine dans cette approche. Tout au plus pourrait-on parler de "composition de domaines" ! Et c'est du fait de ce principe que la méthode n'a en rien besoin d'hypothèse de "good shielding approximation".

Du point de la topologie, les techniques de durcissement ou déclinaison des contraintes n'utilise de la topologie que le nom associé à la représentation par volumes d'équipements appartenant à une structure commune. Dans le cas de la méthode de Kron, la topologie est une topologie cellulaire attachée au graphe que l'ingénieur dessine pour représenter le problème. La représentation de l'espace est celle de l'espace électromagnétique et des composants électroniques. Aucune frontière n'est définie, mais des frontières apparaissent d'elles-mêmes (ce sujet dépasse le cadre de cet article). Enfin la méthode permet d'établir les équations du problème, mais les applications numériques ne sont nullement guidées par la méthode. Mathématiquement on peut décrire les processus des deux premières méthodes en disant que pour la démarche de durcissement on essaie de rendre les fonctions α et β aussi petites que possible en agissant sur la structure. Dans la démarche de déclinaison des contraintes, on cherche usuellement les générateurs de Thévenin ou Norton équivalents aux bornes des entrées d'équipements. Le tenseur z est modifié pour remplacer les charges réelles par des circuits ouverts ou des courts-circuits. On en déduit ensuite les générateurs équivalents. En pratique, on se raccroche souvent à des niveaux de contraintes appliqués suivant des cahier des charges ou des normes suivant des familles de sévérité qui renvoient aux zones concernées. Cette approche s'avère la plus simple à mettre en œuvre, mais aussi la plus grossière du point de vue de l'optimisation du système pour la CEM.

En synthèse on peut dire que la méthode de Kron permet de théoriser le système étudié, alors que les méthodes de CEM système plus "classique" le théorise incomplètement et cherche avant tout à estimer directement le risque de perturbation. De fait la comparaison des approches n'est pas pertinente et la méthode de Kron peut

se positionner en exercice préliminaire à toutes les autres. Dans cet article nous présentons l'analyse d'un camion qui est un système parmi d'autres. Des applications numériques ont été réalisées mais auraient pu l'être par le biais de divers outils. En dernière question, on peut se demander qu'elle est la validité de la représentation que l'on se donne du système, autrement dit, peut-on valider la topologie choisie ?

III. Validation d'une topologie

Une topologie est caractérisée par un espace de configuration choisi et une définition de voisinage appliquée à un espace défini. Pour complètement définir ces voisinages et les propriétés de l'espace topologique considéré, on se dote d'une métrique, définition qui s'accompagne de celle d'un espace dual, etc. [2]. Plus généralement on peut même affirmer que tout espace métrique est associé à un espace topologique. Dans la technique de décomposition de domaines, on ne définit pas de métrique, ni d'espace dual, etc. La "topologie électromagnétique" de Carl Baum s'appuie sur un formalisme matriciel, non pourvu d'espace dual et donc non pourvu de métrique. De fait on ne peut parler pour la démarche de C. Baum que de topologie descriptive provenant de l'identification des "voisinages" au sens d'appartenance aux domaines. La méthode de Kron qui s'appuie sur l'analyse tensorielle des réseaux au contraire est entièrement construite sur la création d'un espace dual et d'une métrique issue de la correspondance entre l'espace dual et l'espace naturel. Or mathématiquement, on se dote d'une métrique, elle n'est pas unique. Par contre on démontre que le choix de cette métrique ne doit pas impacter les résultats. On peut donc affirmer que l'on se dote d'une métrique et que l'on choisit une topologie associée. Que signifie alors la validation de ces choix ? C'est une question très difficile. Il nous semble qu'une partie de validation peut être réalisée par la confrontation entre les prédictions de la théorie utilisant la topologie choisie et les mesures issues des expériences sur le système étudié. Dans le cadre de cet article, la question ne se pose pas puisque nous présentons ici une méthodologie appliquée à un système imaginaire. Les cas de validation de topologies décrites sous le formalisme de Kron sont disponibles dans de nombreux articles accessibles par ailleurs.

IV. PRÉSENTATION DU VÉHICULE

La figure 3 présente le véhicule considéré. Il est constitué d'une cabine et d'une remorque. Cinq équipements et leurs câblages associés sont pris en compte : contrôle moteur, boîtier de servitude, chauffage cabine, airbag, batterie et éclairage. Si l'ingénieur en CEM démarre un projet entièrement nouveau il partagera l'information des hypothèses d'architecture de départ avec les autres métiers

dont principalement l'architecte électrique électronique et les designers mécaniciens. La représentation du système est encore assez sommaire à ce niveau mais cela suffit à déterminer des architectures plus risquées que d'autres pour la CEM et de fait pour orienter la conception du système. La disposition des organes ou équipements

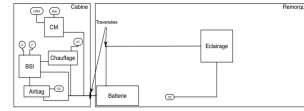


Fig. 3. Schéma des éléments considérés dans le véhicule.

globalement définie, il faut passer à la description de l'échelle inférieure pour pouvoir faire des chiffrages. L'étape suivante consiste donc à se doter d'équipements.

V. ÉQUIPEMENTS

Chaque équipement est modélisé sous la forme d'un schéma électrique équivalent dédié. Ils sont caractérisés par des seuils de susceptibilité pour chacune des entrées d'équipements. Dans ces schémas, les interfaces d'entrée / sortie sont considérées. La figure 4 montre le schéma considéré pour l'équipement "Chauffage".

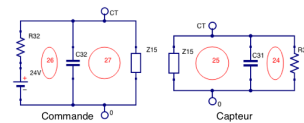


Fig. 4. Schéma considéré pour le chauffage.

Point important, l'origine de ces schémas peut être en provenance des équipementiers. En effet, ils ne trahissent en rien les détails de la conception et présentent seulement les mêmes comportements électromagnétiques. Leurs constructions n'est pas triviale, mais elle donne les moyens de concevoir le système sans avoir à partager les détails des électroniques, donc en respectant les propriétés intellectuelles (PI) et les responsabilités. Ce constat est un élément fort en faveur de l'approche que nous proposons. Les échanges de fichiers de CAO, par exemple de schémas SPICE étant plus simples mais ne respectant pas les aspects PI et responsabilité. Le travail de macro-modélisation par ailleurs peut partir de ces fichiers mais représente en soit un travail supplémentaire quel que soit le mode de construction choisi. Enfin ces macro-modèles sont très facilement paramétrables et donc autorisent les analyses pour l'optimisation du système comme son étude en contraintes multiphysiques.

VI. CÂBLAGES

Des modèles de Branin peuvent être utilisés pour prendre en compte les câblages [3]. Dans la mesure où l'objectif

est de théoriser le système, le modèle de Branin est idéal car il est le plus compact des modèles permettant les interactions sur les lignes ou entre un champ et une ligne. Le modèle de Branin est entièrement décrit par les équations de Branin :

$$\begin{cases} e_1 = (V_2 - Z_c i^2) e^{-\tau p} \\ e_2 = (V_1 + Z_c i^1) e^{-\tau p} \end{cases} \quad (4)$$

V_1, i^1 et V_2, i^2 sont les tensions et courants en extrémité de ligne et e_1 et e_2 les forces électromotrices (fém) reportées par les ondes réfléchies et propagées. p est l'opérateur de Laplace. En exprimant les grandeurs dans l'espace des mailles et non plus des branches tel qu'il est exprimé originellement, on obtient un couple d'équations faisant clairement apparaître des impédances de couplages :

$$\begin{cases} E_1 = (Z_c - Z_L) I^2 e^{-\tau p} \\ E_2 = (Z_c + Z_0) I^1 e^{-\tau p} \end{cases} \quad (5)$$

les grandeurs majuscules renvoyant aux mailles en extrémité de la ligne. Z_0 est l'impédance de la source et Z_L l'impédance de charge. On peut alors calculer l'induction issue d'un champ externe, comme présenté figure 5 et calculer les fém ajoutées à celles de Branin et représentant la part d'énergie apportée par le couplage avec le champ.

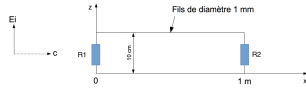


Fig. 5. Couplage champ - ligne.

Pour la configuration précédente, on démontre que le report de fém par exemple en télédiaphonie (au point opposé à l'extrémité où le champ est incident) s'exprime par :

$$e_t = hcB_i (1 - e^{-2\gamma L}) \quad (6)$$

h étant la hauteur de ligne, c la célérité, B_i le champ magnétique incident et L la longueur de ligne. La comparaison du calcul sous le modèle de Branin inscrit dans l'espace des mailles et la relation donnée par Smith est donnée figure 6. On constate la très bonne correspondance entre les deux calculs.

VII. CONSTRUCTION DU SYSTÈME

Les N équipements appartenant au système sont associés à N matrices impédances Z_n . La construction du véhicule commence par la construction d'une super matrice résultant de la somme directe de ces sous-matrices $\oplus_i Z_i = Z$ (c'est la matrice correspondant au tenseur fondamental de la méthode de Kron). La matrice obtenue est ensuite complétée par les couplages entre les équipements intervenant comme des blocs extra-diagonaux dans la

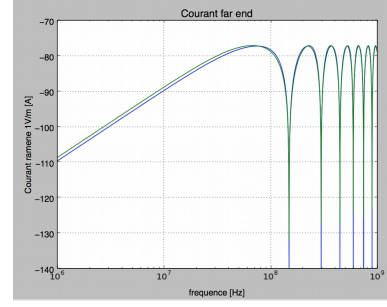


Fig. 6. Couplage champ - ligne : calculs.

super matrice. Ces interactions sont construites suivant le graphe d'interaction présenté figure 7. Dans ce graphe, chaque cercle jaune est une maille et les lignes entre les cercles sont des cordes traduisant les interactions rayonnées. Ce type de graphe est particulier à cette méthode de prédiction et ne fait référence à aucune autre approche.

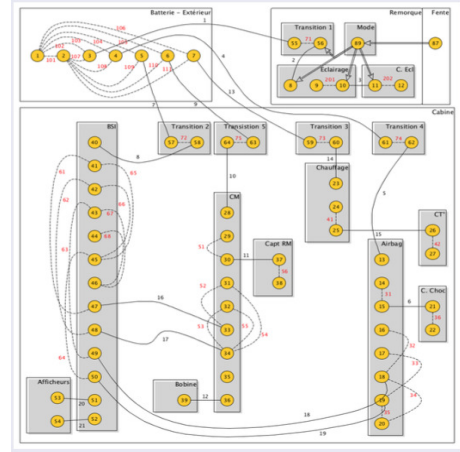


Fig. 7. Graphe d'interactions du véhicule.

VIII. INTERACTIONS

Les interactions sont de différents types : ce peut-être des interactions de champs proches ou lointain, par diffusion, etc. Une interaction correspond à l'interaction du champ avec la cabine d'une part et avec la remorque d'autre part. La cabine étant munie de grandes ouvertures, elle n'est pas considérée comme un milieu résonant, de ce fait, le champ interne sera évalué comme étant la somme du champ incident externe auquel est ajouté le champ généré par les courants induits circulant autour des ouvertures. Un second type d'interaction correspond aux interactions fonctionnelles. Ces interactions s'effectuent entre les sources internes et les lignes reliant les différents équipements. Ces lignes sont modélisées par des cellules des télégraphistes du fait du spectre basse fréquence des générateurs fonctionnels. La figure 8 nous montre, par un graphe, les interactions présentes depuis l'environnement

jusqu'à l'intérieur du camion. En pratique les interactions de la CEM sont ajoutées après avoir construit le système fonctionnel. Elles peuvent être intuitées par l'ingénieur de CEM, où il peut décider d'ajouter de façon exhaustive toutes les interactions possibles entre les électroniques. Tout l'intérêt de la méthode est qu'un ingénieur expérimenté peut à volonté prendre en compte plus ou moins d'interactions suivant son expérience. Certes il pourra découvrir a posteriori qu'une omission s'avère être impactante, mais c'est bien par ces confrontations entre l'expérience et les calculs que se construisent l'expertise, la connaissance des éléments influents et le progrès par l'erreur. De plus, le formalisme de Kron accepte n'importe quelle fonction comme opérateur d'impédance. Elle suit de fait sans difficulté l'évolution des technologies dès lors que le travail de modélisation et caractérisation amont des matériaux est effectué.

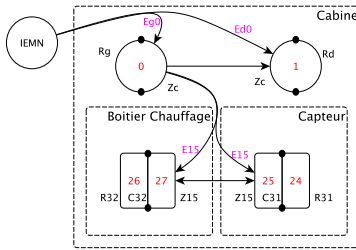


Fig. 8. Schéma d'interactions de la cabine.

La remorque, quant à elle, sera considérée comme une cavité. Les interactions dans les cavités sont calculées par les produits scalaires des modes du champ dans la cavité avec les champs de l'objet inséré couplé. De nombreuses confrontations ont été réalisées pour éprouver les différents macro-modèles utilisables dans le formalisme de Kron pour modéliser des cavités remplies (sans parler des modèles issus d'outils numériques avec maillages). Dans un premier temps les interactions sont pointées et peuvent être notées de façon abstraites, pour indiquer les éléments qui devront être renseignés ultérieurement. La précision des résultats dépend de la qualité des modèles et de la qualité de l'implémentation numérique qui permettra de résoudre le système d'équations établi par la méthode de Kron. La figure 9 montre un calcul sur une cavité munie de deux objets couplés à l'intérieur réalisé simultanément par la numérisation d'une équation établie avec la méthode de Kron et des macro-modèles de type matrice chaîne et le même problème simulé par le code FDTD TEMSI-FD.

Dans le cas du système présenté, l'établissement du graphe prend de l'ordre de 2 à 3 heures suivant l'expérience des personnes. La numérisation du problème peut prendre une journée avec une bonne connaissance des techniques numériques et de l'algèbre tensoriel. Il devient alors très rapide d'explorer de nombreuses hy-

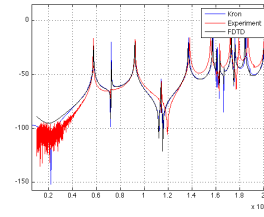


Fig. 9. Comparaison calcul à partir des équations établies par Kron et TEMSI-FD.

pothèses, le temps de calcul étant ici un paramètre non significatif. La figure 10 montre le courant calculé sur le capteur dans la cabine.

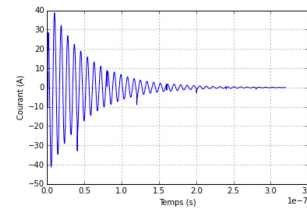


Fig. 10. Courant calculé sur le capteur.

IX. CONCLUSION

Les bilans et matrices d'interactions développés par Don White, Mardiguian, ..., comme les outils conduisant à des déclinaisons de contraintes associées à des standards fournissent des réponses pour l'ingénieur en charge de la CEM du système en développement. Mais ces techniques ne permettent pas de théoriser le problème ni d'en appréhender la globalité dans le détail. La méthode de Kron donne cette possibilité et de fait fournit une technique unique, sans parler de ses capacités à modéliser des processus physiques multiples et complexes. Le résultat donné figure 10 peut paraître anodin, mais quelle autre méthode permettrait de l'établir avec la même expertise et de l'exploiter dans un objectif d'optimisation de la conception avec la même souplesse et efficacité ? L'exemple traité ici du camion a montré que la méthode de Kron en suivant les étapes préconisées pour la CEM donnait ces capacités et couvrait les besoins dans le contexte d'un système de cette ampleur. Il reste aujourd'hui à construire des processus automatisés pour aborder un système de la taille d'un porte-avion par exemple.

REFERENCES

- [1] O. Maurice, La compatibilité électromagnétique dans les systèmes complexe. 2007. Lavoisier, Cachan, 256 p.
- [2] Denis-Papin, Maurice, A. N. Kaufman. Cours de calcul tensoriel appliqué. 1966. Dunod, Paris, France.
- [3] O. Maurice, M. Bréant, G. Duchamp, T. Dubois, To improve the variability of one complex system with the MKME. 17-21 Sept 2012. In : IEEE, EMC Europe, Rome.